

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБНЫХ ЗАГОТОВКАХ

С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов, А.В. Тропотов, М.А. Горланов, В.П. Семенов
(ГОУ ВПО "УГТУ—УПИ", ОАО "РЗОЦМ")

Abstract

The review of methods of definition of residual macroscopic and microscopic stresses of the in cold deformed metal products and, in particular, in the cold-drawn pipes received by sink drawing is executed. The opportunity of application and prospect of development of known methods of a rating of quality of pipes, for example, brass for thermo exchange devices is analyzed. The review of ways of elimination and decrease of a level of residual Sink drawing is given during cold plastic processing and after it. Influence of the basic technological parameters of drawing rods and tubes on a level and distribution of residual stresses is considered. As conclusions from the state-of-the-art review it is shown, probably, a perspective orientation of experimental and theoretical researches with the purpose of perfection of existing technologies sink drawings for reception of pipes with favorable distribution of residual stresses.

Выполнен обзор методов определения остаточных напряжений первого и второго рода в холодно-деформированных металлических изделиях и, в частности, в холодноотянутых трубах, полученных безоправочным волочением. Проанализирована возможность применения и перспективы развития известных методов для оценки качества труб, например, латунных для теплообменных аппаратов. Дан обзор способов устранения и снижения уровня остаточных напряжений в процессе и после холодной пластической обработки. Рассмотрено влияние основных технологических параметров волочения сплошных и полых профилей на уровень и распределение остаточных напряжений. В качестве выводов из аналитического обзора показана возможная перспективная направленность экспериментальных и теоретических исследований с целью совершенствования существующих технологий безоправочного волочения для получения труб с благоприятным распределением остаточных напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из причин Чернобыльской трагедии называют влияние остаточных напряжений в трубках тепловыделяющих элементов, выполненных из циркония, на работоспособность конструкции реактора. Утверждают, что завод изго-

товитель внес изменения в процесс термомеханической обработки, не согласуя эти изменения с потребителем. В результате часть трубок разрушилась в процессе эксплуатации, вызвав утечку радиоактивного вещества и последующую аварию в целом. Это обстоятельство говорит о важности и необходимости и анализа ситуаций, возни-

кающих в производстве и эксплуатации полуфабрикатов с наличием остаточных напряжений.

Чаще всего совершенствование технологии металлообработки предполагает борьбу с остаточными напряжениями. Однако они могут быть как опасными для эксплуатационных свойств изделий, так и являться весьма эффективным средством повышения многих характеристик металла. Наличие остаточных напряжений в изделиях может вызывать коробление, растрескивание из-за коррозии, хрупкое разрушение, понижение предела упругости материала, изменение предела усталости и т. д. Самопроизвольное коробление изделий наблюдается даже при продолжительном вылеживании их без применения. Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях особенно вредны для металлоизделий, работающих при знакопеременной нагрузке, так как такие напряжения способствуют усталостному разрушению (усталостная трещина, как правило, зарождается на поверхности изделия). Вредное действие остаточных напряжений сказывается и в повышении общей химической активности металла. Особенно вредно усиление межкристаллитной коррозии под действием растягивающих остаточных напряжений (сезонное растрескивание латуни) [1].

В то же время в результате исследований [2] установлено, что благоприятное распределение остаточных напряжений в изделиях может повысить их вибрационную и усталостную прочность. Поверхность изделий, как правило, является наиболее "слабой" зоной, поэтому любой процесс, который ведет к возникновению и росту поверхностных сжимающих напряжений, будет благоприятным для работы материала.

Следовательно, в разработке любой технологии производства металлоизделий усилия должны направляться не на борьбу с остаточными напряжениями, а на их оптимальное управление, т. е. на поиск таких распределений напряжения, которые гарантированно улучшают эксплуатационные свойства изделий. Без сомнения, такая оптимизация технологий трудна из-за многообразия причин порождения остаточных напряжений и сложности механизмов их измерения при неоднородных полях деформаций и температур, при фазовых превращениях и структурных перестройках металлов и сплавов.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Остаточными принято называть напряжения, наблюдаемые в материале при отсутствии внешних воздействий (силовых и тепловых) [2, 3]. Микронапряжения действуют в объеме зерна металла или сплава, макронапряжения в объеме заготовки или детали. По Н.Н. Давиденкову [5] остаточные напряжения любой природы в металлах подразделяются на три рода:

— напряжения первого рода, уравнивающиеся в пределах областей, размеры которых одного порядка с размерами тела;

— напряжения второго рода, уравнивающиеся в объемах, размеры которых одного порядка с размерами зерен;

— напряжения третьего рода, уравнивающиеся в объемах одного порядка с размерами элементарной кристаллической ячейки.

Остаточные напряжения первого рода возникают под влиянием неоднородного охлаждения или нагрева, наклепа или фазовых и структурных превращений. Эти напряжения оказывают существенное влияние на поведение металла при воздействии внешних нагрузок и на многие его механические свойства.

Механизм возникновения в поликристаллах напряжений второго рода наглядно показан в работах [6, 7]. Если некоторая область деформируемого металла представлена несколькими разориентированными кристаллами, то общая макродеформация этой области выражается формулой

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{пл} \cdot i \cdot \delta + \varepsilon_{упр} \cdot (1 - i \cdot \delta),$$

где i — число зон пластичности на 1 см длины области;

δ — размер этих зон в направлении действующего напряжения.

Например, рассматривается совместная деформация трех смежных зон, из которых средняя испытывает пластические деформации, а обе крайние находятся в упругом состоянии. Поведение этих зон и механизм возникновения остаточных напряжений при снятии нагрузки легко иллюстрируется трехстержневой механической системой, нагруженной общей внешней нагрузкой. После разгрузки в средней зоне возникают сжимающие остаточные напряжения, а в крайних — растягивающие. Следовательно, между смежными зонами возникают внутренние напряжения, которые изменяют межплоскостное расстояние в атомной решетке. Но деформация может быть неоднородной не только в отдельных кристаллах, но и в отдельных блоках и даже в различных участках одного и того же блока. Напряжения могут быть уравновешены внутри микрообласти, и не оказывать влияния на величину и распределение остаточных напряжений первого рода.

Напряжения третьего рода возникают при переходе атомов через потенциальные барьеры, то есть при их перемещениях на расстояния не меньше половины межатомного расстояния [8]. Они нарушают кристаллическую структуру и ответственны за необратимый характер пластической деформации металлов, при которой внутренняя энергия повышается на величину:

$$\Delta U = \delta A - \delta Q,$$

где δA — работа внешних сил при деформации; δQ — теплота, выделяющаяся в пластически деформируемом теле.

Здесь будут подвергнуты анализу методы определения остаточных напряжений, которые можно использовать применительно к заготовкам, имеющим форму трубы или кольца, не имеющих сварных швов. Методы определения остаточных напряжений в сварных конструкциях представляют собой самостоятельную и большую область исследований.

При определении остаточных напряжений первого и второго рода широко используются как аналитические, так и экспериментальные методы. Следует отметить, что первые до настоящего времени остаются более совершенными и полезными в технологической практике. Скорее всего, такая ситуация сохранится и в дальнейшем, поскольку среди известных методов опытного определения остаточных напряжений любого рода нельзя выделить какой-либо, как перспективный и непротиворечивый.

Приближенные формулы, полученные инженерным методом, для определения остаточных осевых, тангенциальных и нормальных радиальных напряжений в канатной проволоке после волочения приведены в работе [9]. Подобная задача с использованием тензорного анализа была решена С.И. Петрухиным [10], но лишь в общем виде. Численная процедура и доказательство адекватности построенной математической модели не приводятся.

Интерес для практики представляют теоретические исследования, приведенные в работах [11, 12]. Опираясь на многочисленные исследования внутренних напряжений в стальных холодноотянутых пружинах, в полых цилиндрах, подвергнутых раздаче, и в калиброванных или в цилиндрических заготовках, подвергнутых дробеструйной обработке, показана возможность, с помощью методов теории размерностей делать простые расчеты внутреннего напряженного состояния, возникающего при этих процессах холодной пластической деформации. Эти расчетные методы теории размерностей включают в себя в основном приемы теории моделирования и размерного анализа, основой которого является так называемая л-теорема. Под анализом размерностей понимают вывод уравнений из величин, характерных для данной проблемы.

При исследовании процесса волочения прутков выбираются наиболее характерные величины, задающие свойства материала и некоторые параметры процесса:

σ_T — предел текучести; σ_s — сопротивление деформации; G — модуль сдвига; μ — коэффициент Пуассона; r — текущий радиус или q — поперечное сечение; q_0 — исходное сечение или r_0 — радиус сечения прутка; Δr_0 — уменьшение радиуса прутка или Δq_0 — распределение внутренних осевых, тангенциальных и радиальных напряжений.

Из безразмерных соотношений указанных величин необходимо составить подходящие функции типа:

$$F\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_T}; \frac{q}{q_0}; \frac{\sigma}{\sigma_T}; \frac{\Delta q_0}{q_0}; \frac{G}{G_0}; \mu\right) = 0 \quad (*)$$

Подходящая функция, построенная по законам моделей, будет характеризовать конкретный случай волочения. Безразмерные остаточные напряжения, рассчитанные согласно подходящим функциям для конкретного процесса, представляются в виде отвлеченных чисел, и им в соответствие ставятся истинные значения остаточных напряжений, возникающих в данном случае волочения, найденные экспериментально.

После этого модель можно считать построенной и готовой к использованию для самого объекта. Закономерности, обобщенные моделью, могут быть распространены на другие процессы волочения, соответствующие критериям подобия, заложенным в модель.

Рассмотренное в качестве примера выражение (*) выступает как модель процесса волочения, в которой подобие распространено лишь на свойства протягиваемого материала и обжатия при волочении. Легко догадаться, что в случае необходимости модель может быть построена по признаку подобия других, вероятно любых, параметров.

В работе [11] приведены эмпирические формулы, полученные на основе размерного анализа, для расчета распределения продольных и тангенциальных остаточных напряжений в холодно-тянутых прутках:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{3} \cdot \sigma_T \ln \frac{2G}{G_T} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta q_0}{q_0} \right) \times \\ &\quad \times \left[\frac{2}{3} \left(\frac{q}{q_0} - \frac{1}{4} \right)^2 \cdot 10 - 1 \right]; \\ \sigma_\varphi &= \frac{2}{3} \cdot \sigma_T \ln \frac{2 \cdot G}{\sigma_T} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta q_0}{q_0} \right) \times \\ &\quad \times \left[\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{q}{q_0} - \frac{1}{4} \right)^2 \cdot 10 - 1 \right]. \end{aligned}$$

В соответствии с теоремой Генки о разгрузке, нашедшей обоснование в работах А.А. Ильюшина [13], остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упруго-пластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нем при предположении об идеальной упругости материала. Как отмечается В.Л. Колмогоровым [14], теорема предполагает, что при разгрузке не возникают вторичные пластические деформации, и она осуществляется только упруго. В книге [15] приведено решение задачи расчета остаточных напряжений после волочения трубы без оправки. Сделан вывод о том, что оправочное волочение труб обеспечивает меньший уровень остаточных напряжений и меньшую вероятность трещинообразования.

В работе [16] выполнен анализ образования остаточных напряжений в проволоке после операции волочения. Учтены факторы неравномерного распределения температур по поперечному сечению проволоки в результате выделения тепла за счет трения о поверхность волоки. Учтена также деформация, достигаемая при сползании витков по конической части волочильного барабана. Для решения задачи использованы уравнение теплового баланса, и гипотеза о слоистом строении проволоки, последний подход позволил дискретизировать решение.

В работе [17] выполнен расчет остаточных напряжений после упруго-пластической деформации вариационным методом. Остаточные напряжения заданы в виде отрезка степенного ряда с варьируемыми параметрами (метод Ритца). Конкретизация решения достигнута при описании напряженного состояния листа при изгибе и кручения круглого прутка. Отмечено, что вариационное решение применимо при известном поле пластических деформаций, при этом теорема о разгрузке не применяется.

Экспериментальной оценке величины остаточных напряжений в холоднотянутых и, в частности, в трубных заготовках посвящено достаточно большое количество научных работ [3—17]. В специальной литературе введен термин "механические методы замера остаточных напряжений" [32], который относится к приемам, связанным с созданием условий для разгрузки образца путем удаления напряженных слоев, замером деформации и последующим расчетом остаточных напряжений. Обычно в качестве образцов используют кольца или полоски. По кольцевому образцу определяют тангенциальные напряжения, а по полоске — осевые напряжения. Для анализа остаточных напряжений в прутках сравнительно большого диаметра широко применяется разрушающий метод Кулакуцкого [4], основанный на изучении изменения диаметра концентрических рисков, наносимых на подготовленной торцевой поверхности деформированной заготовки. В работе [18] применяли этот метод для оценки распределения остаточных напряжений в кованых титановых заготовках, усовершенствовав его, с целью автоматизации обработки опытных данных, за счет использования тензометрии при замере распределения деформаций в сечении заготовки на каждом этапе послойного снятия металла с боковой поверхности поковки. Поле деформации расчетным путем преобразовывали в поле остаточных напряжений.

В монографии И.А. Биргера [4] рассмотрено образование остаточных напряжений после пластических деформаций и после интенсивного нагрева или охлаждения. Проанализировано влияние остаточных напряжений на прочность при статических и переменных нагрузках. Приводится теория механических методов, основанная на подходах Г. Закса, Н.Н. Давиденкова. В качестве немеханического способа определения напряжений предложен рентгеновский метод.

Список экспериментальных методов может быть продолжен упоминанием об акустическом и магнитошумовом методе [19, 20]. Последний метод не применим для немагнитных материалов. Достоинство состоит в том, что эти способы относятся к неразрушающим методам контроля.

Французские разработчики из фирмы CAN-TOR COLBURN [21] запатентовали в США метод измерения остаточных напряжений с помощью ультразвука. При этом измеряется время прохождения волны между двумя концами заготовки в нагруженном и ненагруженном состоянии. Расчет напряжений делается на основе сравнения углов наклона нагрузочных диаграмм.

Институтом проблем механики УрО РАН [22] предложен способ измерения остаточных напряжений методом зондирующей лунки в сочетании с голографической интерферометрией. Во время первой экспозиции лазерным сканированием записывается голограмма окрестности будущей лунки на поверхности объекта в исходном состоянии, потом создается возмущение поверхности тела высверливанием или травлением лунки. Это позволяет проявиться остаточным напряжениям: изъятие малого объема металла приводит к локальным упругим перемещениям, пропорциональным остаточным напряжениям. Записывается голограмма возмущенной поверхности и накладывается на первоначальную голограмму. Усовершенствованный вариант этого метода получил название спекл-интерферометрии. В отличие от предыдущего способа, требующего применения фотографии, новый способ основан на цифровой записи полученных голограмм, в том числе в динамике и расшифровке их с помощью ЭВМ. Метод применен, в том числе, для измерения остаточных напряжений в латунных втулках подшипников железнодорожных вагонов, что позволило отбраковать изделия с неудачными режимами термической обработки и не допустить аварий на железных дорогах.

Кафедрой оборудования и технологии сварочного производства Южно-Уральского государственного университета предложен метод пенетрации для определения остаточных напряжений. Метод основан на использовании эффекта неравномерного деформирования поверхности тела с остаточными напряжениями при ее локальном упругопластическом контактом взаимодействии с шаровым индентором. При силовом контакте недеформируемого индентора и пластическим полупространством формируется зона выпучивания металла. По ее профилю судят о характере напряжений, используя упомянутые выше методы фото или спекл-интерферометрии.

ВНИИМЕТИЗом [23] использовался метод определения остаточных напряжений в проволоке, состоящий в последовательном срабатывании поверхностного слоя и регистрации длины образца с точностью 0,01 мм. Отличие метода заключается в том, что измерения проводятся непрерывно, образец постоянно расположен в емкости

с кислотой, регистрация удлинения производится индикатором часового типа. Величина продольных остаточных напряжений подсчитывается по формуле Хейна [24]

$$\sigma_x = E \cdot \frac{r_n^2 \cdot (l_n - l_0) - r_{n-1}^2 \cdot (l_{n-1} - l_0)}{(r_{n-1}^2 - r_n^2) \cdot l_0},$$

где σ_x — остаточные напряжения в слое металла;
 E — модуль упругости первого рода;
 l_0, l_{n-1}, l_n — длины образцов;
 r — радиус обрабатываемого образца;
 $n, n-1$ — индексы, определяющие порядковый номер стравливаемого концентрического слоя металла.

В исследовании выявлены зоны положительных и отрицательных остаточных напряжений. При этом в зависимости от степени деформации характер распределения напряжений резко меняется. При степенях деформации 15—25 % в центре наблюдались напряжения растяжения, при деформации 33 % — напряжения сжатия. На периферии полуфабриката знак напряжений также зависел от степени деформации. Следует отметить, что эти выводы касаются патентированной стали.

Кафедрой динамики и прочности машин Пермского государственного технического университета разработаны методики расчета остаточных напряжений изделий из дисперсноупрочненных композиционных материалов, а также созданы новые способы снижения уровня этих напряжений [40]. Доказаны экстремальные вариационные принципы для остаточных напряжений и деформаций. Сформулирована целевая функция в гильбертовом пространстве, описывающая уровень остаточных напряжений через текущие параметры. Построены расчетные схемы для решения задач термоупругопластичности в процессах прокатки и волочения. В работе [40] приводится количественный анализ теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Самарским государственным аэрокосмическим университетом ведутся исследования остаточных напряжений по традиционным методикам съема поверхности в полуфабрикатах после магнитно-импульсной обработки.

Фирмой ЗАО "НПЦ Контакт" в Санкт-Петербурге освоено производство приборов для неразрушающего контроля остаточных напряжений на глубину до 10 мм.

В статье [25] определены величины оваллизации и уровня остаточных напряжений при бухтовом волочении труб. Исследования выполнены на Кольчугинском заводе ОЦМ кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов Московского государственного института стали и сплавов. Поставленная задача решалась вариационным методом, в котором варьируемыми параметрами являлись коэффициент оваллизации и безразмерное относительное напряжение воло-

чения. В решении учтено увеличение диаметра бухты при сбросе ее с волочильного барабана. Полученные эпюры распределения остаточных напряжений имеют вид синусоиды с тремя нулевыми значениями напряжения. Методика позволяет оценить возможность оваллизации труб и уровень остаточных напряжений.

Применительно к анализу остаточных напряжений в холоднотянутых трубах, в свое время был разработан [26] метод непосредственного замера поверхностных деформаций при разгрузке трубы. Разгрузочные напряжения предложено определять следующим образом. Если разрушенное изделие вновь нагрузить внешней нагрузкой, несколько меньшей, чем при пластической деформации, то оно будет деформироваться упруго. Величину истинных разгрузочных напряжений находят, используя подобие эпюр напряжений в упругой области. Величину и направление главных напряжений определяют с помощью тензометрических датчиков, наклеенных на поверхность трубы перед упругим нагружением. Исходя из величин и направлений главных напряжений, по известным зависимостям определяют нормальные и касательные напряжения на любых наклонных площадках. Определив поля напряжений на поверхности пластически деформированной трубы и разгрузочных напряжений, по разности напряжений находят поля остаточных напряжений на поверхности трубы после пластической деформации.

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Статья [17] посвящена изучению перераспределения остаточных напряжений в канатной проволоке и прутках путем термопластической обработки. Использован подход с позиций теоремы о разгрузке и привлечением условия постоянства массы в виде уравнения объемной сжимаемости. Сжимаемость достигнута за счет разницы в деформациях, достигаемых при неравномерном распределении температур по поперечному сечению проволоки. Результаты расчетов по этой методике показывают, что нагрев с последующим быстрым охлаждением приводит к существенному изменению характера распределения напряжений по поперечному сечению, при определенных режимах тепловой обработки на поверхности заготовки появляются "благоприятные" сжимающие остаточные напряжения, повышающие усталостную прочность.

Американской фирмой EXTRUDED METALS [27] запатентован метод снижения остаточных напряжений в прессованных и холоднодеформированных полуфабрикатах, выполненных из так называемой желтой (свинцовой) латуни. Отмечено, что остаточные напряжения локализуются вблизи поверхности при ограничении обжатий и использовании волок с малым углом конусности. Такое исполнение инструмента минимизирует

напряжения в центре заготовки, перемещая область их расположения вблизи поверхности. Заготовку затем подвергают знакопеременному изгибу. Способ позволяет ликвидировать остаточные напряжения до уровня, характерного для отожженного или горячедеформированного состояния обработки. Окончательной фазой обработки является проведение серии проходов через последовательно расположенные ролики с целью упрочнения металла.

Китайская фирма TIANXING RATE EARTH FUNCTION [28] запатентовала конструкцию генератора виброколебаний для снятия внутренних напряжений в заготовках. Установка отличается тем, что имеет переносную головку для создания колебаний на основе электромагнита. Метод заключается в том, что встроенный контроллер автоматически определяет время процесса и другие параметры до достижения эффекта снятия внутренних напряжений.

Японская фирма TOKYO DENRYOKO запатентовала способ устранения остаточных напряжений в холоднотянутых полуфабрикатах из меди и ее сплавов. Используется протяжное устройство, имеющее последовательно расположенные вращающиеся втулки. Оси втулок смещены от оси подачи заготовки, устройство реализует принцип знакопеременного изгиба [31].

В российском изобретении [29] предложено применять к заготовкам, имеющим остаточные напряжения, все виды правки, а особенно применять виды нагружения, характерные для условий эксплуатации.

Институтом проблем машиностроения Национальной Академии Украины предлагается вибрационная технология уменьшения остаточных напряжений. Особенностью является поддержание резонансных режимов виброобработки.

В разработках, выполненных Научно-техническим центром "Вега" Института импульсных процессов и технологий и институтом проблем НАН Украины предложен метод снятия внутренних напряжений многократными импульсами давления, генерируемыми высоковольтными разрядами в воде или иной жидкости. Снижение напряжений происходит вследствие активизации возбуждаемыми в жидкости волнами напряжений естественных дислокационно-сдвиговых релаксационных процессов. Процесс позволяет также удалить окалину с поверхности полуфабриката или детали.

При безоправочном волочении труб возможно появление трещин в результате действия остаточных тангенциальных напряжений. В книге [30, с. 117] предложено совместить безоправочное волочение с раздачей трубы на выходе из волоки. В этом случае оправка имеет больший диаметр, чем диаметр полости трубы после волочения. Следует отметить, что в обычном короткооправочном волочении стержень оправки испытывает действие напряжений растяжения от сил трения на контактной поверхности оправки. В

данном способе напряжения растяжения стержня, удерживающего оправку, окажутся выше, т.к. возникают напряжения от раздачи трубы, стержень может не выдержать этих дополнительных напряжений. Поэтому степени деформации раздачи должны быть не велики. Кроме того, способ безоправочного волочения лишился своих преимуществ, он превратился в способ оправочного волочения.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ВЕЛИЧИНУ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

На величину и характер распределения остаточных напряжений по поперечному сечению наклепанных прутков, проволоки и труб оказывают влияние: подготовка поверхности металла к волочению; величина суммарного обжатия; угол рабочей зоны волоки; химический состав сплава; величина единичных обжатий при постоянном суммарном обжатии; температурно-скоростные условия волочения; способ приема протянутого металла после выхода из волоки; смазка и способ ее подачи в зону обжатия [33]. При многопроходном бухтовом волочении проволоки и труб важным фактором, влияющим на величину остаточных напряжений, является противонапряжение [34, 35].

Процесс подготовки поверхности металла к волочению заключается в удалении с поверхности окалины, образовавшейся после горячих прокатки или прессования. Несмотря на сравнительно высокую температуру горячего передела, в металлоизделиях образуются остаточные напряжения при их охлаждении на моталках или при замачивании. Роль процесса подготовки поверхности заготовки к волочению состоит не только в очистке ее от окалины, но и в частичном снятии остаточных напряжений, поскольку при этом с поверхности удаляется некоторый слой металла, в котором чаще всего локализуются растягивающие осевые и тангенциальные напряжения.

Наиболее важным вопросом в производстве холоднотянутых прутков, проволоки и труб из любых металлов и сплавов является вопрос об оптимальной величине единичных обжатий. Самыми первыми крупными обстоятельными работами, посвященными данному вопросу, были исследования Бюлера [11, 12]. Остаточные напряжения измерялись на прутках больших диаметров (порядка 50 мм) из медных сплавов и стали с различным содержанием углерода после волочения с малыми обжатиями. Остаточные напряжения определялись по величине упругой деформации тянутых образцов после односторонней послойной фрезеровки. Именно Бюлер открыл эффект резкого снижения остаточных напряжений при волочении с малыми обжатиями. В результате многочисленных исследований одно- и многопроходного волочения Бюлер пришел к следующим выводам.

– При незначительном обжатии (от 0,4 до 1 %) на поверхности прутков возникают сжимающие как продольные, так и тангенциальные напряжения, а в середине — растягивающие. Это объясняется тем, что благодаря совместному действию трения и радиальных сжимающих усилий наружные слои прутка растягиваются в продольном направлении. При выходе из волоки практически удлиненная поверхностная зона стремится удлинить также и его сердцевину, которая подвергалась лишь упругим деформациям;

– При обжатии прутка более чем на 1 % знак напряжений меняется, при этом самые высокие напряжения возникают в поверхностных зонах;

– При обжатиях порядка 0,9 % поверхностные напряжения близки к нулю.

На эффективность чистовых проходов с малыми обжатиями указывает достаточно большое количество исследований различных авторов. В частности, И.Л. Перлин [36] рекомендует вести волочение при максимальных единичных обжатиях, а в последних проходах для выравнивания напряжений снижать обжатия до 0,8—1,5 %.

Существенное влияние на величину остаточных напряжений в поверхностных слоях холоднотянутых изделий оказывает распределение единичных обжатий по маршруту волочения [37]. Применение "жестких" (30—33 %) обжатий по маршруту с "облегченной" (4—6 %) последней протяжкой позволяет снизить остаточные напряжения в 2,8—3,0 раза по сравнению с другими вариантами маршрута.

Что касается влияния величины угла рабочего конуса волоки на возникающие после волочения остаточные напряжения, то здесь мнения большинства исследователей совпадают. Так Б.Н. Гайдученко [33], исходя из опытных данных по волочению канатной проволоки, указывает, что увеличение угла рабочего конуса с 5 до 100 увеличивает максимальную величину растягивающих напряжений в полтора — три раза в зависимости от величины частных обжатий. Установлено, что при постоянном обжатии с уменьшением угла конусности волоки, осевые остаточные напряжения на поверхности проволоки снижаются. С ростом угла рабочей зоны волоки увеличивается и составляющая нормального напряжения на контактной поверхности, параллельная оси канала, что приводит к большему отставанию периферийных слоев от центральных и, следовательно, к большим дополнительным осевым остаточным напряжениям.

Химический состав сплавов также влияет на величину остаточных напряжений [33]. Результаты исследований волочения стальной проволоки с содержанием углерода от 0,16 до 0,81% показывают, что растягивающие остаточные напряжения на поверхности растут при концентрации углерода от 0,40 до 0,45 %, а затем падают. При этом напряжения сжатия в центре непрерывно возрастают. Определяя рентгеновским методом величину остаточных напряжений второго рода в

патентированной и затем протянутой проволоке с различным содержанием углерода, работники ЦЗЛ Белорецкого металлургического комбината установили, что с увеличением содержания углерода, остаточные напряжения растут после патентирования и остаются практически неизменными после волочения.

Влияние скорости волочения на величину остаточных напряжений, сказывается в следующем: чем выше скорость, тем меньше уровень напряжения трения, меньше неравномерность деформации по сечению и, следовательно, ниже остаточные напряжения [33,38].

Что касается влияния смазки, то чем она лучше, т. е., чем меньше коэффициент контактного трения, тем меньше касательные, а значит и растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях. Опытные данные [37] показывают, что при плохой смазке остаточные напряжения в приконтактной зоне проволоки возрастают настолько, что сами могут вызвать разрушение металла.

Исследуя искажения координатных сеток, нанесенных на продольных разрезах прутков и труб по плоскости диаметра, авторы [39] установили, что при волочении в режиме гидродинамического трения в волоке имеет место более равномерная деформация по сечению проволоки, чем при волочении в режиме граничного трения. Это дает основание предположить, что в готовом изделии, полученном методом волочения в режиме гидродинамического (или гидростатического) трения, распределение остаточных напряжений по сечению будет более благоприятным.

При производстве холоднотянутых труб в основном сопоставляются по влиянию на величину и распределение остаточных напряжений различные схемы волочения [14, 26]. Установлено, что наиболее неблагоприятным способом является безоправочное волочение, после которого уровень поверхностных остаточных как осевых, так и тангенциальных напряжений наиболее высок. Применение оправок во всех случаях способствует уменьшению напряжений. Возможны даже варианты, при которых на поверхности труб после волочения возникают сжимающие остаточные напряжения. В результате анализа результатов многочисленных исследований И.А. Соколовым, и В.И. Уральским [41] показано, что изменением технологических параметров процесса волочения, формы инструмента, а также последовательностью операций, можно добиться желаемого уровня и благоприятного характера распределения остаточных напряжений в холоднотянутых трубах.

Противонапряжение во всех видах волочения снижает уровень остаточных напряжений, как в прутках, так и в трубах [30, 34, 35]. Это легко объясняется снижением контактных давлений и трения, и, следовательно, уменьшением неравномерности распределения деформаций по сечению протягиваемого изделия и приконтактного разо

грева металла. При волочении с противонапряжением уменьшение угла рабочего конуса волокна более естественно, поскольку с ростом заднего натяжения, интервал оптимальных углов (минимум силы волочения) смещается в сторону меньших значений. Особенно эффективно волочение с противонапряжением с малыми единичными обжатиями. Сравнительно высокое напряжение волочения с противонапряжением зачастую способствует уменьшению поверхностных растягивающих остаточных напряжений за счет внеконтактной пластической деформации.

АКТУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Приведенный здесь краткий аналитический обзор проблемы определения уровня остаточных напряжений в металле после холодной пластической деформации и известных технологических приемов, нацеленных на повышение эксплуатационных свойств металлоизделий, не дает возможности сформулировать производственные рекомендации и наметить мероприятия по избавлению труб (в частности латунных) от растягивающих поверхностных остаточных напряжений.

Главная трудность в решении проблемы определяется несовершенством методов измерения остаточных напряжений. Оптимизация технологии невозможна без надежного определения функции отклика.

Введена некоторая геометрическая классификация остаточных напряжений, но не выяснено, напряжения какого рода пагубно влияют на эксплуатационные характеристики изделий. С ростом каких напряжений проявляется наиболее явно "сезонное растрескивание" латуней?

В описанных экспериментальных методах чаще всего невозможно установить род напряжений, их направление, распределение в объеме, а иногда и знак. Активно обсуждаются продольные (осевые), тангенциальные, иногда радиальные остаточные напряжения, осознанно или интуитивно считая их главными. Однако напряженное состояние характеризуется тензорными величинами. В объеме деформированного тела всегда можно выделить оптимальные направления действия главных напряжений и максимальных касательных напряжений. Возможно, положительное напряжение σ_{11} или максимальное из τ_{ij} , и являются провокаторами разрушения холоднотянутых изделий. То, что раскол трубы развивается по ее образующей, еще не говорит о том, что тангенциальное напряжение σ^{\wedge} является главным, так как трещина направляется текстурой металла (деформационной или рекристаллизационной) и продольными рисками, неминуемо возникающими на поверхности тянутой заготовки. Нельзя исключить развития микротрещин за счет действия касательных остаточных напряжений. Тогда наибольшую опасность представляет максимальное касательное напряжение в объеме заготовки.

Поэтому анализ осевых и тангенциальных остаточных напряжений вряд ли выявляет истинные причины разрушения. До настоящего времени не изучены механизмы зарождения и развития микро- и макротрещин под действием внутренних напряжений.

Перечисленные методы замера остаточных напряжений не позволяют однозначно утверждать, что рассчитанные значения напряжений соответствуют конкретному направлению. О знаке напряжений можно судить лишь в том случае, когда определена область их уравнивания. Если на уровне замыкания напряжений второго рода установлено действие сжимающих напряжений, то нельзя утверждать, что на макро-уровне остаточные напряжения также сжимающие. Это легко проиллюстрировать простейшей моделью. Пусть эластичная оболочка (мешок) заполнена мелкими пружинами. Если нагрузить оболочку, и рассмотреть отдельные пружины или группы пружин, то легко найти растянутые. Однако по их состоянию нельзя судить о напряженном состоянии макрообъема нагруженной оболочки.

Ртутные и аммиачные пробы при определении склонности высокоцинковых латуней к межкристаллитной коррозии выявляют лишь наличие остаточных напряжений без определения их рода и направления. Поэтому результаты анализа мало помогают в выяснении причин возникновения этих напряжений.

Метод разрезных колец [4], в его классическом понимании сложен в реализации, поскольку требует после разрезки кольца послойного сравнения с замером изменений диаметра и пересчетом по условию равновесия тангенциальной составляющей остаточных напряжений. Расчет напряжений ведется всегда в рамках гипотезы линейного распределения напряжений в оставшихся слоях трубы, хотя эта гипотеза и нуждается в подтверждении. В модифицированном виде метод разрезных колец распространен на промышленных предприятиях в качестве средства количественной оценки уровня тангенциальных остаточных напряжений в трубах. Упрощен метод отсутствием послойного сравнения. При таком использовании метода, результаты замеров напряжений чаще всего оказываются абсурдными. Если эпюра тангенциальных напряжений симметрична относительно средней линии сечения трубы, то после разрезки кольца его диаметр не изменяется, и будет сделан вывод об отсутствии напряжений. На самом деле и очень высокие по уровню напряжения могут быть уравновешены по изгибающим моментам. Даже правильное применение (с травлением) метода разрезных колец к анализу остаточных напряжений в латунных трубах не гарантирует достоверного результата. При сравнении учитывается средняя толщина сравненного слоя, определяемая, например, весовым способом. Однако при травлении латуней границы зерен легко протравливаются на сравнительно большую глубину, и раз-

грузка по остаточным напряжениям проходит более интенсивно, что не учитывает расчетная процедура и что, скорее всего, невозможно учесть в реальных условиях испытаний.

Все сказанное в равной степени относится и к методам вырезаемых полосок, по деформации которых судят об уровне продольных остаточных напряжений. Распределение продольных напряжений в стенке трубы, вероятно, можно определить методом послойного стравливания, широко распространенным в проволоочном производстве, и до сих пор не трансформированным в метод определения напряжений в трубах.

Рентгеновские методы не дают возможность определять остаточные напряжения первого рода, которые, по нашему мнению, в наибольшей степени ответственны за работоспособность конструкций и эксплуатационные свойства металлоизделий. Уровень и знак микронапряжений зависят в большой степени от размеров зерна и базы сканирования. В изготовлении эталонных образцов, лишенных остаточных напряжений, существуют значительные трудности. Даже изготовленный из порошков эталонный образец не может быть разгружен полностью. Исходный порошок на микро-уровне всегда подвержен действию остаточных напряжений. При прессовании порошка из-за неравномерности распределения давлений по объему брикета, возникают напряжения первого рода, от которых трудно избавиться при отжиге. При температурах отжига развиваются процессы коагуляции (спекания), интенсивность которых зависит от плотности. Спекание и частичная рекристаллизация характеризуются новым распределением остаточных напряжений. Поэтому создание эталонных образцов, по которым можно надежно оценить рентгеновский шум, проблематично еще и по причине отсутствия методов их аттестации.

Определение направлений действия напряжений рентгеновскими методами принципиально невозможно. Расположение щели, вдоль которой проводят сканирование при съемке, говорит лишь о направлении усреднения замеренных напряжений, но не о направлении действия самих напряжений.

Методы голографической топографии, эффективно применяемые для анализа остаточных напряжений в крупногабаритных конструкциях, трудно адаптировать к оценке качества холодно-тянутых труб, особенно тонкостенных. Существенная неравномерность распределения деформаций и температуры в стенке трубы провоцируют пиковые значения поверхностных остаточных напряжений. При этом особенно высокие значения напряжений сосредотачиваются в очень тонком (0,2...0,4 мм) поверхностном слое [7]. Топографические изменения поверхности анализируемого образца в голографических методах порождаются локальными механическими воздействиями (сверление, внедрение инденторов и др.). Деформация окрестности отверстия или лунки не

дает представления о поверхностных напряжениях, т.к. в нее вовлекаются глубинные слои металла. Надежность пересчета деформаций в напряжения определяется выбором физического уравнения связи. Чаще всего это уравнение — закон Гука. Если деформируемая среда проявляет свойства нелинейной упругости, то ошибка в определении остаточных напряжений неизбежна и трудно определима.

Приходится признать после анализа известных методов, что определить экспериментально остаточные напряжения в трубах с требуемой точностью невозможно. Остаются теоретические методы, перспективность которых представляется более реальной. Хотя до настоящего времени не решено ни одной серьезной задачи, описывающей напряженное состояние после холодной пластической деформации, принципиальной невозможности таких решений, по нашему мнению, не существует.

Теорема о разгрузке вполне успешно используется, когда есть уверенность в линейности упругого состояния и в полном отсутствии при разгрузке (механической и тепловой) как пластических деформаций, так и фазовых превращений в металле. Высокоцинковые латуни, обладая нелинейной упругостью, являются неудобным сплавом для применения теоремы о разгрузке. Краевые задачи теории пластичности в вариационной постановке при непрерывной или дискретной реализации, в ближайшем будущем станут универсальным инструментом анализа полей остаточных напряжений даже в тонкостенных трубах. Трудность в осуществлении этого теоретического анализа сегодня состоит в определении крайних условий, без которых бесполезны любые современные пакеты прикладных программ. Поэтому, возрастает роль экспериментальных методов механики пластической деформации именно в области описания граничных условий.

Знание технологии производства конкретного изделия в частности латунных труб для теплообменных аппаратов, позволяет сформировать общее представление о крайних условиях и особенностях напряженно-деформированного состояния и предсказать характер, и даже уровень остаточных напряжений в холоднодеформированных трубах.

Появление остаточных напряжений в трубах после волочения объясняется неравномерной пластической деформации, неизбежными тепловыми воздействиями и фазовыми превращениями в метастабильной двухфазной структуры высокоцинковой латуни.

Процесс изменения временных и возникновение остаточных напряжений в трубе можно разбить на четыре этапа.

1. При выходе металла из очага деформации поперечные слои трубы переходят из пластического в упругое состояние, т. е. происходит своеобразная разгрузка деформированного металла. Поскольку речь идет об упрочняющемся матери-

але, а деформация по сечению существенно не равномерна, любая разгрузка неминуемо приводит к возникновению неравномерно распределенных временных напряжений по сечению. Максимальная степень деформации и, следовательно, максимальное степенное упрочнение локализуется в приконтактном слое. Таким образом, при разгрузке появляется тенденция к росту растягивающих временных напряжений на наружной поверхности трубы. Латунь интенсивно упрочняется уже при сравнительно малой степени деформации. При больших суммарных обжатиях (за несколько волочильных проходов) латуни слабо проявляют склонность к упрочнению. Поэтому интенсивные приконтактные сдвиги, порождаемые трением, оказывают значительное влияние на неравномерное распределение временных напряжений в стенке трубы и на пиковые значения поверхностных растягивающих напряжений лишь в первых проходах безоправочного волочения.

2. Труба, выходящая из очага деформации, имеет неравномерное поле температур. По всему сечению трубы пропорционально интенсивности деформации распределено тепло пластической деформации. На наружной поверхности трубы имеются значительные пики температуры, возникающие в результате действия контактного трения. При выходе из волоки теплота внешнего трения заключена в очень тонком приконтактном слое трубы. В следующий момент начинаются тепловые процессы выравнивания температуры по сечению стенки трубы. Второй этап изменения временных напряжений, содержащий понижение и перераспределение температур по сечению, продолжается до момента полной разгрузки трубы.

3. После завершения волочения происходит полная механическая разгрузка и продолжается тепловая разгрузка.

4. При последующем охлаждении (как правило, медленном) поле остаточных напряжений видоизменяется только за счет неравномерного охлаждения и возможных пластических деформаций. Тепловая обработка при отпуске завершает процессы формирования конечного поля остаточных напряжений.

Если считать растягивающие продольные и тангенциальные остаточные напряжения на наружной поверхности холоднотянутой трубы вредными для эксплуатационных условий, то их снижение, или даже перевод в сжимающие, возможны лишь за счет уменьшения неравномерности распределения деформации, снижения контактного разогрева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конечно-разностный метод анализа остаточных напряжений для осесимметричного напряженно-деформированного состояния, представленный в работе [3], удобен для поэтапного рас-

чета с учетом неравномерного распределения как деформаций, так и температур по сечению трубы. Достаточно просто учитываются локальные пластические деформации, развивающиеся при разгрузке. Если трудности металлургического характера преодолены при экспериментальном исследовании, то задача об определении тепловых напряжений с учетом фазовых превращений не должна встретить непреодолимых трудностей. Таким образом, следует признать возможность разностным методом с достаточной для инженерной практики точностью легко и быстро получать решение при любых граничных условиях охлаждения с учетом пластических деформаций и фазовых превращений. Метод удобен тем, что задача расчета деформированного состояния и температурных полей в трубе при волочении решается независимо от построения разностной математической модели полей остаточных напряжений в трубе после завершения всего технологического цикла. Поэтапный анализ остаточных напряжений позволит оптимизировать технологию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков И.Н. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1978. 392 с.
2. Кудрявцев И.В. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность стали. М.: ВИНТИ, 1957. 17 с.
3. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. М.: Металлургиздат, 1962. 356 с.
4. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
5. Давиденков Н.Н. В кн. Рентгенография в применении к исследованию материалов. М.: Изд. ОНТИ, 1936. 248 с.
6. Косолапов Г.Ф. Рентгенография. М.: Высшая школа, 1962. 332 с.
7. Немец Я. Жесткость и прочность стальных деталей. М.: Машиностроение, 1970. 528 с.
8. Buhler H., Pbnge W., Archiv f. Eisenhittenwesen, № 8 (1934/35), s.165—168.
9. Козлов В.Т., Высочин В.Д. К вопросу определения остаточных напряжений после волочения. Стальные канаты. Вып.3. Киев: Изд. "Техника", 1965. С. 376—379.
10. Петрухин С.Н. Исследование остаточных напряжений в канатной проволоке и процесса ее получения волочением на жидкой смазке через волоки с напорными трубками. Диссертация к.т.н. Магнитогорск, 1969.
11. Buhler H., Lehmann Th., Schmitt F.I. Untersuchungen über die dimensionsanalytische Berechnung vor Eigenspannungen in gezogenen Staben. Archiv für das Eisenhüttenwesen, 36 (1965). S. 29—34.
12. Buhler H., Schmitt F.I. Untersuchungen über die Anwendung dimensionsanalytischer Verfahren auf die Berechnung von Eigenspannungen durch Kaltumformung. Draht, № 2, 1966. S. 57-61.
13. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: МГУ, 1978. 288 с.
14. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2001. 836 с.
15. Буркин С.П., Картак Б.Р., Щипанов А.А. Расчет остаточных напряжений в холоднотянутой проволоке. В сб. "Обработка металлов давлением". Вып.3. Свердловск: УПИ, 1976. С. 76—80.
16. Тропотов А.В. Расчет остаточных напряжений после упруго-пластической деформации вариационным методом. В сб. "Обработка металлов давлением". Вып. 8. Свердловск: УПИ, 1981. С. 139—143.
17. Козлов В.Т., Туманский В.И. Перераспределение остаточных напряжений в канатной проволоке и прутках путем термопластической обработки. В сб. "Теория и практи-

- ка метизного производства". Вып.5. Свердловск: УПИ, 1976. 109—114.
18. Влияние режимов деформации и термической обработки на величину и распределение остаточных напряжений в штамповках из титановых сплавов./ Аношкин Н.Ф., Брун М.Я., Быкова Л.А. и др. // В кн. Обработка легких и специальных сплавов. М.: Изд. ВИЛС, 1996. С. 106—116.
19. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. Киев: Вища школа, 1987. 245 с.
20. Экспериментальная механика. Пер с англ. Под ред. А.Кобаяси. М.: Мир, 1990. 615 с.
21. Patent US2001/0001929. Method for measuring by ultrasound the residual tension of a pre-stressed bar. CANTOR COLBURN LLP. B.Basile(Fr), B.Lancia. IPC COIN 3/08. Publ. 31.05.01.
22. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения. Природа, 2002, № 10. http://vivovoco.nns.ru/VV/JOURNAL/NATURE/10_02/STRAINS.HTM/
23. Красильников Л.А., Зубов В.Я. Релаксационная стойкость и циклическая прочность холодноотянутой проволоки. М.: Металлургия, 1970. 168с.
24. Юхвец И.А. Производство высокопрочной проволоочной арматуры. М.: Металлургия, 1973. 264 с.
25. Мочалов Н.А., Белов М.И., Мочалов С.Н. Определение величины овализации и уровня остаточных напряжений при бухтовом волочении труб. Известия вузов. Цветная металлургия. 2002, № 1.
26. Соколов И.А., Колмогоров В.Л. Остаточные напряжения после пластической деформации металлов. В кн. Проблемы деформации металлов. М.: Металлургия, 1968. С. 34-43.
27. Patent US4216666. Method of relieving stress in extruded sections. EXTRUDED METALS. Wu Hiao. IPC B21C 19/00. Publ. 12.08.80.
28. Patent CN1298771. Vibration generator and method for eliminating residual stress of metal parts with it. TIANXING RATE EARTH FUNCTION M(CN). Hao Junshan. IPC B06B 1/08, C21C 10/00. Publ. 13.06.01.
29. Заявка на изобретение RU92005149. Способ и устройство для снижения внутренних напряжений в деталях типа валов. В.В.Вождаенко. МПК6 B24B39/00. Опубл.27.07.95.
30. Савин Г.А. Волочение труб. М.: Металлургия, 1982. 160с.
31. Patent JP60056431. Method for removing residual stress of solid wire of twisted wire of hard drawn copper wire.. TOKYO DENRYOKO KK. Uchida Shingo (JP). IPC B21FB 21/00. Publ. 02.04.85.
32. Дроздов В.М., Казанцев А.С. Оценка механических методов определения остаточных напряжений. В кн. "Новые методы испытания и обработки материалов". Минск: Наука и техника. 1975. С. 23—29.
33. Гайдученко Б.И. Остаточные напряжения и усталость проволоки. Материалы н.-п. Семинара, 27—29.09.65, Одесса. М.: Черметинформация, 1967. С. 3—13.
34. Берман А.Ф. Исследование процесса безоправочного волочения труб с противонапряжением. Диссертация к.т.н. Куйбышев, 1975.
35. Берман А.Ф., Батист А.И. Влияние противонапряжения на процесс безоправочного волочения труб. Сб. "Технология легких сплавов", № 1, М.: ВИЛС, 1974.
36. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 448 с.
37. Козлов В.Т., Высочин В.Д. Влияние параметров волочения на остаточные напряжения в канатной проволоке. В сб. Стальные канаты, вып. 5. Киев: Техника, 1968. С. 312—315.
38. Недовизий Н.Н., Тарнавский А.Л. Скоростное волочение низкоуглеродистой стальной проволоки. М.: Металлургиздат, 1954. 188 с.
39. Christopherson D.B., Naylor H. The promotion of fluid lubrication in Wire drawing. P.J. The wire Industry, 1955, v. 22. № 260. P. 775—777.
40. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: Теория и приложения. М.: Наука, 1982. 112 с.
41. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981.96 с.